

水位低下及び遮水シートを考慮した河川堤防の浸透変形連成解析

京都大学大学院

学生会員

○森中雄一

京都大学大学院

フェロー会員

岡二三生

京都大学大学院

正会員

木元小百合

日建設シビル(株)

正会員

加藤亮輔

中日本高速道路(株)(元 京都大学大学院)

正会員

田中智太郎

京都大学大学院

学生会員

山崎真也

1.研究背景と目的

近年、計画高水位を超える集中豪雨や洪水が多発しており、水位上昇による浸透破壊の他、水位低下による堤防の表法面の崩壊などの事例が報告されている。本研究では液状化解析に開発している LIQCA2D04¹⁾ をベースに開発した LIQCA2D04-SF²⁾ を用いて堤防の浸透-変形連成解析を行い、遮水シートを考慮した場合についても堤防の安全性について検討した。

2.混合体の密度と応力

本研究における混合体の密度と応力を次式に示す。

$$\rho = \bar{\rho}^s + \bar{\rho}^f + \bar{\rho}^a \quad (1) \quad \bar{\rho}^s = (1-n)\rho^s \quad (2)$$

$$\bar{\rho}^f = nSr\rho^f \quad (3) \quad \bar{\rho}^a = n(1-Sr)\rho^a \quad (4)$$

ここで ρ は三相混合体全体の密度、 ρ^s, ρ^f, ρ^a はそれぞれ固相、液相、気相の構成物質の密度である。また、 S_r は飽和度、 n は間隙率である。

$$\text{固相: } \sigma_{ij}^s = \sigma_{ij}'' - (1-n)Sr\rho^f\delta_{ij} - (1-n)(1-Sr)\rho^a\delta_{ij} \quad (5)$$

$$\text{液相: } \sigma_{ij}^f = -nSr\rho^f\delta_{ij} \quad (6)$$

$$\text{気相: } \sigma_{ij}^a = -n(1-Sr)\rho^a\delta_{ij} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^s + \sigma_{ij}^f + \sigma_{ij}^a \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}'' - (Sr\rho^f\delta_{ij} + (1-Sr)\rho^a\delta_{ij}) \quad (9)$$

ここで σ_{ij}'' は骨格応力テンソル、 σ_{ij} は全応力テンソルであり、 $\sigma_{ij}^s, \sigma_{ij}^f, \sigma_{ij}^a$ はそれぞれ固相、液相、気相の分応力テンソルである。ただし、水圧、空気圧は圧縮を正としている。

3.砂の弾塑性構成式

岡³⁾らは以下で示すような過圧密境界面及び降伏関数、塑性ポテンシャル関数及び構成式を用いて砂の弾塑性構成式を表現した。

$$\text{過圧密境界面: } f_b = \bar{\eta}_0^* + M_m^* \ln \frac{\sigma_m''}{\sigma_{mb}''} = 0 \quad (10)$$

$$\text{降伏関数: } f = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} - k = 0 \quad (11)$$

$$\text{塑性ポテンシャル関数: } g = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma_m''}{\sigma_{mb}''} = 0 \quad (12)$$

$$\text{構成式: } d\sigma_{ij}'' = D_{ijkl}^{EP} d\epsilon_{kl} \quad (13)$$

ここで、 M_m^* は体積圧縮ひずみが最大となるとき

応力比、 χ_{ij}^* は移動硬化パラメータ、 η_{ij}^* は現在の応力比テンソルである。

4.支配方程式

支配方程式として、連続式と運動方程式を空間離散化、時間離散化した式を用いている。以下に連続式と運動方程式を示す。なお、本研究では間隙空気圧の剛性を 0 と仮定し、 $p^a = 0$ kPa とした三相系簡易法を用いて解析を行った。

$$\text{連続式: } -\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k}{\gamma_w} \left(\rho^f \ddot{u}_i^s + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho^f b_i \right) \right\} + S_r \dot{\epsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K_f} \dot{p} = 0 \quad (14)$$

$$\text{運動方程式: } \rho \ddot{u}_i^s = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (15)$$

ここで、 b_i は物体力として重力加速度、 $\ddot{u}_i^s$ は固相の加速度である。空間離散化には有限要素法及び差分法を、時間離散化には Newmark の β 法を用いている。

5.不飽和特性

不飽和特性のとして、水分特性曲線 van Genuchten 式⁴⁾を用いて与えている。

$$S_e = (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m} \quad (16)$$

ここで、 S_e は有効飽和度 ψ はサクションである。また、 α, m, n は形状パラメータである。

6.解析モデル

本研究で用いた河川堤防のモデルを図 1 に示す。

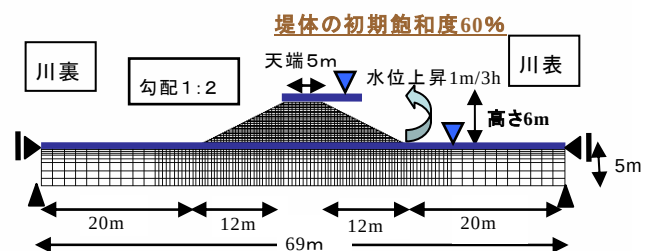


図 1 解析モデル

初期状態では水位は基礎地盤上端にある。この水位を以後、初期水位と呼ぶ。そこから 1/3 m/s で 18 時間かけて水位を天端まで上昇させ、約 34 時間水位を天端の高さに保つ。その後、同じ速度 1/3 m/s で水位を初期水位まで下げる。解析は 210 時間まで行った。case1 は、遮水シートの挿入を考慮せず、case2 では遮水シートの挿入を考慮し、2つのケースの比較を行った。解析に用いた材料定数²⁾を表1に示す。遮水シートの透水係数は 1.0×10^{-9} m/s とし⁵⁾、川表法面と平行に基礎地盤上端まで被覆土 0.4m とした。堤体の初期飽和度は 60% である。図2に水分特性曲線を示す。

表1 材料パラメータ

初期応力解析	
ヤング係数 E (kPa)	4.67×10^4
ポアソン比 ν	0.40
内部摩擦角 Φ' (deg)	30
パラメータ	
初期間隙比 e_0	0.856
圧縮指数 λ	0.018
膨潤指数 κ	0.0055
初期せん断係数比 G_0/σ'_{m0}	873
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-5}
重力加速度 g (m/s ²)	9.8
破壊応力比 M_r^*	1.122
変相応力比 M_m^*	0.909
硬化関数中のパラメータ B_0^*	2200
硬化関数中のパラメータ B_1^*	30
硬化関数中のパラメータ C_f	0
水の体積弾性係数 K_f (kPa)	2.0×10^5
擬似過圧比 OCR^*	1.0
異方性消失のパラメータ C_d	2000
ダイレイタンス係数 D_0	5.0
ダイレイタンス係数 n	1.5
湿潤密度 ρ (g/cm ³)	1.911
van Genuchten 式の α	2.0
van Genuchten 式の n	4.0

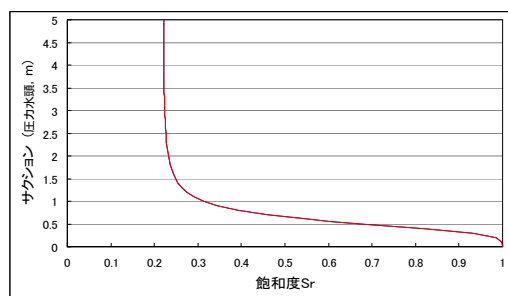


図2 水分特性曲線

7. 解析結果

case1 及び case2 の水位低下直前及び水位低下完了時の飽和度分布図を図3及び図4に示す。

図3より case1 では水位上昇に伴い浸潤面の上昇が見られる。case2 では遮水シートの影響により、浸潤面の上昇が抑制された。

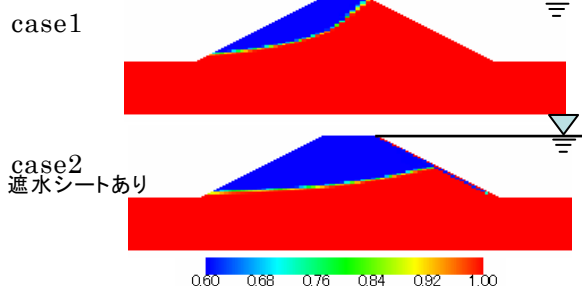
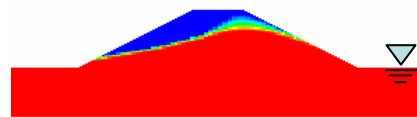


図3 飽和度分布図(水位低下直前)

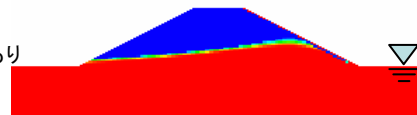
図4より、case1 では浸潤面の低下が見られるが case2 では遮水シートの影響により、堤体内の水が抜けにくい。

case1



case2

遮水シートあり



0.60 0.68 0.76 0.84 0.92 1.00

図4 飽和度分布図(水位低下完了時)

図5に 210 時間後における偏差ひずみ分布図を示す。図5より case1 では川表法面、川表及び川裏法尻付近にひずみの発達が見られた。case2 では川裏法尻部のひずみの発生は抑えられたが、川表側のひずみは増加した。

case1



case2

遮水シートあり



0.0000 0.0025 0.0050 0.0075 0.0100

図5 偏差ひずみの第二不変量分布図(210 時間後)

8. 結論と今後の課題

浸透変形連成解析法を用いて遮水シートを挿入しない場合及び挿入した場合について比較した。遮水シートを挿入していない場合では川裏法尻付近にひずみが発達したのに対し、遮水シートを挿入した場合では川表にひずみが発達し、川裏には小さなひずみの発生しか見られなかった。今後、遮水シートのモデル化について更に検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 岡ら, 国土交通省建設技術研究開発助成報告書, 河川堤防の調査, 再生強化に関する研究, 3, 2007. 2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04 (2004 公開版) 資料, 2004. 3) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., and Yamashita, S.: *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 661-680, 1999. 4) van Genuchten, M. T.: *Soil Science Society of America Journal*, pp. 892-898, 1980. 5) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き, 2002